

0716511-1

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

На правах рукописи

**НЕСМЕЛОВ**  
Евгений Андреевич

**АНАЛИЗ И СИНТЕЗ БЛОКИРУЮЩИХ И УЗКОПОЛОСНЫХ  
ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ**

01.04.05. – Оптика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Казань - 2000 г.

**Работа выполнена в Федеральном научно-производственном центре  
Государственный институт прикладной оптики**

**Официальные оппоненты:**

Дважды лауреат Государственной премии,  
доктор физико-математических наук,  
профессор **ШТЫРКОВ Е.И.**

**НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА  
КФУ**



**0000947819**

Лауреат Государственной премии,  
доктор физико-математических наук,  
профессор **ЗЕМСКОВ Е.М.**

Доктор физико-математических наук,  
профессор **ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ В.А.**

Ведущая организация: ВНЦ "Государственный оптический институт  
им. С.И. Вавилова".

Защита состоится "18" мая 2000 г. в 14 часов на заседании диссертационного  
Совета Д053.29.09 при Казанском государственном университете по адресу: 420008, Казань,  
Кремлевская, 18, физический факультет.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного  
университета.

Автореферат разослан 17 апреля 2000 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета  
кандидат физико-математических наук, доцент

**Сарандаев Е.В.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы.

Оptica тонкослойных интерференционных покрытий начала интенсивно развиваться после второй мировой войны, когда потребовались самые разнообразные приборы наблюдения. Наиболее широкое применение получили просветляющие покрытия на поверхностях оптических деталей. В это же время, в связи с задачами приборостроения, появилась необходимость в выделении участков спектра различной ширины, несущих информацию о наблюдаемых предметах, что и определило широкое использование интерференционных фильтров.

Общие принципы расчета оптических свойств многослойных интерференционных покрытий были заложены трудами А.Г. Власова, Т.Н. Крыловой, П.Г. Карда, П.Х. Бернинга, О.С. Хевенса и многих других. Так, А.Г. Власов сформулировал рекуррентный метод расчета, основанный на применении лучевых представлений, развитый затем Т.Н. Крыловой. П.Г. Кард и другие развили матричный метод, основанный на решении волнового уравнения. Однако построение общих принципов расчета оказалось недостаточным для решения конкретных задач, связанных с изготовлением оптических покрытий. Это послужило основой для постановки задачи синтеза интерференционных пленок т.е. нахождение состава покрытия по заданным спектральным характеристикам. Решение этой задачи проводилось обычным методом вариационной минимизации функционала, характерного для некорректных задач. Наиболее значимые результаты были получены Ш.А. Фурманом, А.В. Тихонравовым, И.М. Минковым, которые, не проводя исследований отдельных классов интерференционных пленок, сразу перешли к решению задачи синтеза интерференционных покрытий по заданным оптическим свойствам. В то же время выяснилось, что решение задачи синтеза для многослойных интерференционных пленок не однозначно и зависит от начальных значений варьируемых параметров (показатели преломления слоев и их толщины), т.е. необходимо находить критерии

правильного выбора начального приближения. Определение подобных критериев требует проведения специального теоретического исследования для каждого класса интерференционных пленок.

Одновременно выяснилось, что физические свойства тонких пленок материалов не совпадают с таковыми для массивного образца и зависят от технологии их получения. Это потребовало расширения теоретических и экспериментальных исследований в направлении изучения оптических свойств тонкослойных интерференционных покрытий и разработке новых методов экспериментального исследования физических и технических свойств материалов в тонких пленках. Важность этих направлений для современной науки и техники трудно переоценить.

### **Цель работы.**

Целью настоящей диссертационной работы является создание теоретической базы для разработки интерференционных фильтрующих покрытий, а также алгоритмов и методов расчёта их оптических характеристик; исследование одно- и многослойных покрытий; разработка физических основ получения интерференционных систем с заданными параметрами.

### **Научная новизна.**

1. Развита теоретический подход к синтезу просветляющих интерференционных покрытий и на его основе впервые проанализированы фильтрующие свойства системы оптических просветленных поверхностей.
2. Построена теория блокирующих интерференционных фильтров. Впервые показана малая чувствительность спектральных характеристик к углу падения излучения на фильтр и поглощению в составляющих его слоях.
3. Впервые с единых позиций проанализированы оптические свойства узкополосных диэлектрических и металлдиэлектрических фильтров; показано, что эти системы отличаются существенной чувствительностью к качеству граничных поверхностей.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА  
им. Н. И. Лобачевского  
Иванового гос. университета



4. Впервые разработаны высокоэффективные методики расчета оптических постоянных тонких интерференционных плёнок.
5. Впервые предложена и апробирована математическая модель, которая описывает оптические свойства нарушенного слоя на поверхности массивной подложки, возникающего за счет механических воздействий при её обработке.

### **Практическая ценность работы.**

Полученные в работе теоретические и экспериментальные результаты позволяют создать базу для решения ряда крупных задач в области оптического приборостроения:

- выделение спектральных областей в оптических приборах различного назначения;
- создание новых элементов мощных лазерных систем;
- создание технологии изготовления интерференционных покрытий.

### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. Система просветленных оптических поверхностей обладает свойством фильтрации проходящего излучения; методы расчета состава просветляющих покрытий.
2. Введение огибающих спектральной прозрачности позволяет описать оптические свойства блокирующих фильтров; оптимизация прозрачности блокирующего фильтра осуществляется путем выбора параметров системы, обеспечивающих заданные свойства огибающих.
3. Образование дублетной структуры полосы пропускания узкополосных фильтров в наклонных пучках излучения обусловлено различием отражения s- и p-компонент излучения от зеркал резонатора; устранение дублетной структуры полосы пропускания узкополосного фильтра в наклонном пучке излучения осуществляется путем специального выбора показателя преломления резонансного слоя.
4. Обеспечить сохранение спектральных свойств узкополосных фильтров в

сходящихся пучках излучения возможно:

- специальным распределением толщины всех слоёв по поверхности фильтра;
- специальным выбором показателей преломления всех слоёв фильтра.

5. Физическая модель влияния шероховатости поверхностей слоёв и подложки на полуширину полосы прозрачности фильтра и его максимальное пропускание.

6. Физическая модель фильтрации излучения металлическим слоем, находящимся в узле стоячей волны.

7. Анализ огибающих к спектральной прозрачности диэлектрической или полупроводниковой плёнки в сочетании с методами эллипсометрии и МНПВО позволяет повысить точность расчета оптических постоянных плёнок и измерить малое поглощение в них.

8. Механическая обработка поверхности подложки приводит к появлению оптической неоднородности, средний размер которой экспоненциально уменьшается с удалением от поверхности вглубь материала; экспериментальные методы определения параметров неоднородного слоя.

### **Внедрение.**

Все результаты, полученные автором при проведении работы, внедрены в производство ФНПЦ ГИПО и ряде предприятий отрасли.

### **Личный вклад автора.**

Автору принадлежат постановка задач, нахождение методов и путей их решения; развитие и обоснование экспериментальных методик; получение, интерпретация и обобщение данных экспериментальных и теоретических исследований.

### **Апробация работы.**

Основные результаты диссертационной работы легли в основу многих технологических разработок лаборатории вакуумных покрытий ФНПЦ ГИПО по созданию интерференционных покрытий для приборов, выпускавшихся в институте и отрасли. Успешное выполнение этих работ достаточно полно характеризует

проведенные исследования.

Кроме того, основные материалы работы докладывались на: VII Симпозиуме по физическим свойствам и электронному строению переходных металлов и соединений (Киев, 1969г.); V Всесоюзной научно – технической конференции “Новые разработки и исследования струйных, механических, электрофизических, сорбционных и других типов вакуумных насосов” (Казань, 1972г.); Всесоюзной конференции “Теория и практика алмазной абразивной обработки деталей приборов и машин” (Москва, 1973 г.); Всесоюзном семинаре “Методы синтеза и применение многослойных интерференционных систем” (Москва, 1984 г.); VII Всесоюзной конференции по физике вакуумного ультрафиолета и его взаимодействию с веществом ВУФ-86 (Эзерниеки, 1986г.); Всесоюзных конференциях “Фотометрия и ее метрологическое обеспечение” (Москва, 1986г. и 1988г.); IV Всесоюзной конференции “Эллипсометрия – метод исследования поверхности твердых тел” (Новосибирск 1989г.); VI Всесоюзном совещании “Применение металлоорганических соединений для получения неорганических покрытий и материалов” (Нижний Новгород 1991г.); отраслевых совещаниях по новым покрытиям и оптической технологии (Москва, 1976, 1977, 1979, 1980, 1981гг.) и I отраслевом семинаре “Автоматизация оптических приборов” (Ленинград 1987г.).

### **Публикации по работе.**

Список трудов автора по теме диссертации включает 81 сообщение. Из них 2 авторских свидетельства, 4 аналитических обзора, 1 отчет по гранту АНТ.

### **Структура и объем работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка цитированной литературы, включающего 345 наименований. Работа содержит 270 страниц текста, 55 рисунков и 7 таблиц.

### **Содержание работы.**

**Во введении** обоснована актуальность темы, цель и задачи исследований, дана

общая характеристика работы, показана научная новизна полученных результатов и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрена общая задача фильтрации излучения применительно к просветляющим и фильтрующим интерференционным покрытиям.

Оптические системы обычно состоят из большого числа элементов. Все оптические материалы, используемые для изготовления оптических элементов, прозрачны в ограниченной спектральной области. За границами этих областей собственное поглощение материалов велико, что приводит к некоторой начальной фильтрации проходящего излучения (выделяется некоторая рабочая спектральная область). Оптический сигнал, поступающий на приемник, пропорционален произведению коэффициентов пропускания элементов системы. Если поглощение в элементах отсутствует, то потери в пропускании через систему складываются из потерь на отражение на каждой поверхности. Суммарные потери на отражение от всех поверхностей оказываются весьма значимыми. Особенно сильно это проявляется в оптических приборах, работающих в инфракрасном диапазоне спектра. В этом случае оптические элементы изготавливаются из прозрачных полупроводниковых кристаллов, имеющих большой коэффициент отражения. Снижение потерь достигается нанесением на поверхности всех элементов просветляющих покрытий.

Просветляющие покрытия могут быть селективными или ахроматическими, что определяется решаемыми задачами. В любом случае они обеспечивают некоторую фильтрацию проходящего излучения. В качестве примера, поясняющего необходимость нанесения просветляющих покрытий, рассмотрим объектив прибора, работающего в области спектра 8 – 12.5 мкм. Обычно для изготовления оптических элементов для указанной области спектра используется монокристаллический германий. Для системы из четырех линз прозрачность оказывается равной 0.0281 от исходной и определяется потерями на отражение. Наличие просветляющих покрытий позволяет поднять прозрачность системы линз практически до единицы.

На рисунке 1 показана спектральная характеристика прозрачности одной просветленной поверхности из германия и спектральная характеристика, соответствующая всему объективу, состоящему из четырех и семи линз.

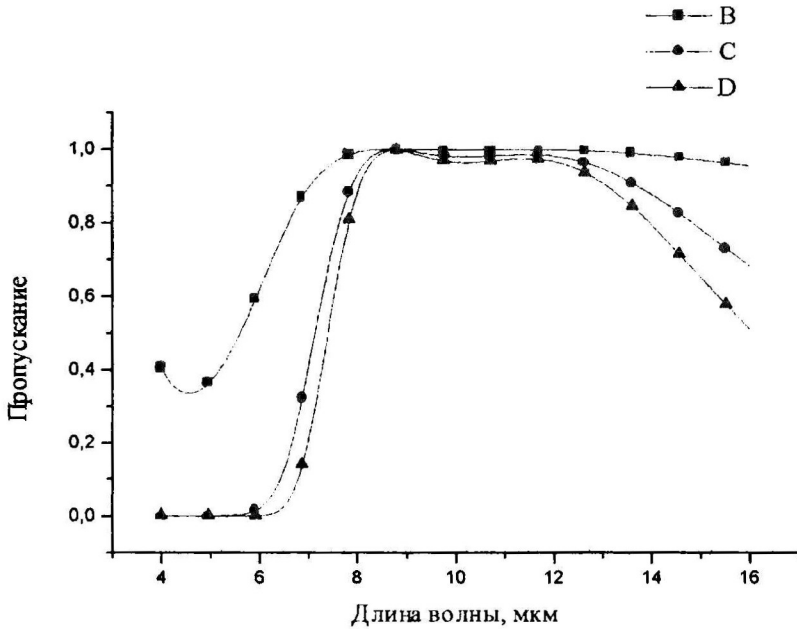


Рис. 1. Спектральная характеристика прозрачности после просветления В – одна поверхность германиевой пластины, С – система из четырех линз (8 поверхностей), Д – система из семи линз (14 поверхностей). Просветляющее покрытие во всех случаях одно и то же: 0.17(35И)0.41(16И)1.02(35И).

Из рисунка видно, что просветляющее покрытие оказывается еще и фильтрующим, т.е. нанесение просветляющих покрытий позволяет, по крайней мере, частично решать задачу фильтрации и, естественно, упростить решение задачи создания

необходимого фильтра.

Основным физическим принципом, лежащим в основе просветления поверхностей, является уравнивание амплитуд при разности фаз равной  $\pi$  для волн, отраженных от поверхности пленки и поверхности подложки. Ясно, что подобный эффект возможен и при сложении любого числа волн.

Максимальное просветление достигается за счет нанесения на оптическую поверхность четвертьволнового слоя с показателем преломления, равным  $\sqrt{n}$ , где  $n$  – показатель преломления подложки. Подобрать материал с таким показателем преломления не всегда возможно, поэтому нами решена специальная задача замены однослойного покрытия трехслойным при общей оптической толщине всего покрытия, меньшей четверти длины волны. При этом ограничений на используемые материалы не существует.

Мы получили соотношения, позволяющие находить толщины слоев симметричного просветляющего покрытия:

$$\cos g_1 \pi = \frac{(n_1^2 - n n_0)(n_1^2 + n_2^2)}{(n_1^2 + n n_0)(n_1^2 - n_2^2)},$$

$$\sin \frac{g_2 \pi}{2} = \frac{n_2(n_1^2 - n n_0)}{(n_1^2 - n_2^2)\sqrt{n n_0}}.$$

Здесь  $g_j$  – оптическая толщина  $j$ -го слоя в долях четверти длины волны,  $n_j$  – показатели преломления слоев,  $n_0$  – показатель преломления исходной среды, а  $n$  – показатель преломления подложки. Так как покрытие симметрично, параметры первого и третьего слоев совпадают. Подобные покрытия применяются в ИК-области спектра и позволяют улучшить эксплуатационные свойства покрытой оптической поверхности.

Кроме этого, в процессе работы был предложен метод нахождения показателей

преломления для многослойного просветляющего покрытия, эффективно работающего в широкой области спектра. При этом следует потребовать выполнения условия заданной кривизны спектральной кривой прозрачности, т.е. использовали её аналитические свойства. При добавлении этого условия к методу поиска состава покрытия методом наименьших квадратов получаются наилучшие результаты.

Многослойные просветляющие покрытия обычно обеспечивают более широкую область малого отражения, чем однослойные. При этом за границами области просветления коэффициент отражения от детали с покрытием оказывается большим, чем от подложки без покрытия. Именно это обстоятельство приводит к появлению фильтрации излучения системой просветленных поверхностей.

Кроме того, в первой главе приведено решение некоторых конкретных задач фильтрации излучения. В ряде случаев в оптических системах используются отражающие элементы. Энергетическая оценка таких систем выполняется также, но под пропусканием соответствующих элементов понимается их коэффициент отражения. Использование отражающих систем энергетически более выгодно тем более, что эти элементы могут дополнительно выполнять и фильтрующие функции.

В качестве примера приведено решение задачи фильтрации с пространственным разведением падающего пучка излучения по нескольким различным спектральным каналам. Это является нетривиальным решением общей задачи фильтрации излучения, нашедшим применение в оптическом приборостроении. Выделение требуемых спектральных полос в этом случае осуществляется блокирующими интерференционными фильтрами с использованием их свойства отражать блокируемую часть спектра.

В качестве второго примера приведено решение задачи выделения заданной полосы спектра при условии полного гашения (до уровня  $10^{-10}$ ) фонового пропускания в нерабочей части спектра. Задачи подобного рода обычно решаются применением материалов, обладающих большим поглощением в нерабочей области

спектра. Подбор подобных материалов возможен далеко не всегда. Именно поэтому приведенное решение оказывается важным и интересным.

**Во второй главе** рассматриваются оптические свойства блокирующих фильтров.

Интерференционные системы, обеспечивающие деление спектра падающего излучения на прошедшее и отраженное, представляются периодическими системами и описываются, как:

$$(0.5NB0.5H)^m, \text{ или } (0.5BH0.5B)^m.$$

Здесь Н – четвертьволновый слой с низким показателем преломления, В – четвертьволновый слой с высоким показателем преломления,  $N=2m+1$  полное число слоев в покрытии. Коэффициентами перед символами слоев обозначено отличие оптических толщин этих слоев от четвертьволновости.

Условие периодичности системы позволяет выделить характерные области в спектре прозрачности:

- область малой прозрачности (область блокировки), для которой увеличение параметра  $m$  ведет к снижению прозрачности;
- область высокой прозрачности, в которой изменение  $m$  приводит только к изменению осцилляций коэффициента пропускания.

Для второй области можно построить огибающие, что позволяет в значительной степени упростить описание спектральных характеристик блокирующего фильтра, сводя его к описанию свойств только одного периода. Такое описание позволило нам определить среднюю прозрачность фильтра в каждой спектральной точке и, что самое главное, определить граничные значения показателей преломления слоев и подложки, обеспечивающие наиболее высокую прозрачность системы.

Проведенный анализ показал, что прозрачность фильтра будет максимальной при выполнении условий на показатели преломления слоев. При заданных  $n_1$  и  $m$  нижняя граница для  $n_2$  определяется выражением:



$$n_2 \leq n_1 \left[ \sqrt{1 + \frac{(n_1^2 - 1)^2}{4n_1^2} \sin^2 \frac{\pi}{2m}} - \frac{n_1^2 - 1}{2n_1} \sin \frac{\pi}{2m} \right]^2.$$

Для сохранения максимальной ширины области высоких отражений (области блокировки) желательно выбирать минимальное значение  $n_2$ . Если  $n_2$  выбрано согласно приведенному условию, то показатель преломления подложки должен быть выбран в соответствии с выражением:

$$n \geq n_1 \left[ \sqrt{1 + \frac{(n_1^2 - 1)^2}{4n_1^2} \operatorname{tg}^2 \frac{\pi}{2m}} - \frac{n_1^2 - 1}{2n_1} \operatorname{tg} \frac{\pi}{2m} \right].$$

Такой выбор показателей преломления подложки и слоев дает наиболее высокую прозрачность фильтра.

Ширина области малого пропускания  $\delta\lambda$  выражается следующим образом:

$$\frac{2\delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\pi}{2} \frac{\pi - 2x}{x(\pi - x)}, \quad \text{где} \quad x = \arccos\left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right).$$

Коэффициент отражения от системы в этой полосе монотонно растет с увеличением параметра  $m$ , ширина же области высокого отражения растет с увеличением разности показателей преломления слоев.

В качестве примера на рисунке 2 приведена спектральная характеристика блокирующего фильтра в сравнении с уровнем пропускания чистой подложки из селенида цинка. Приведенный рисунок хорошо демонстрирует оптимальность спектральной прозрачности фильтра, получаемой при указанном выборе материалов слоев.

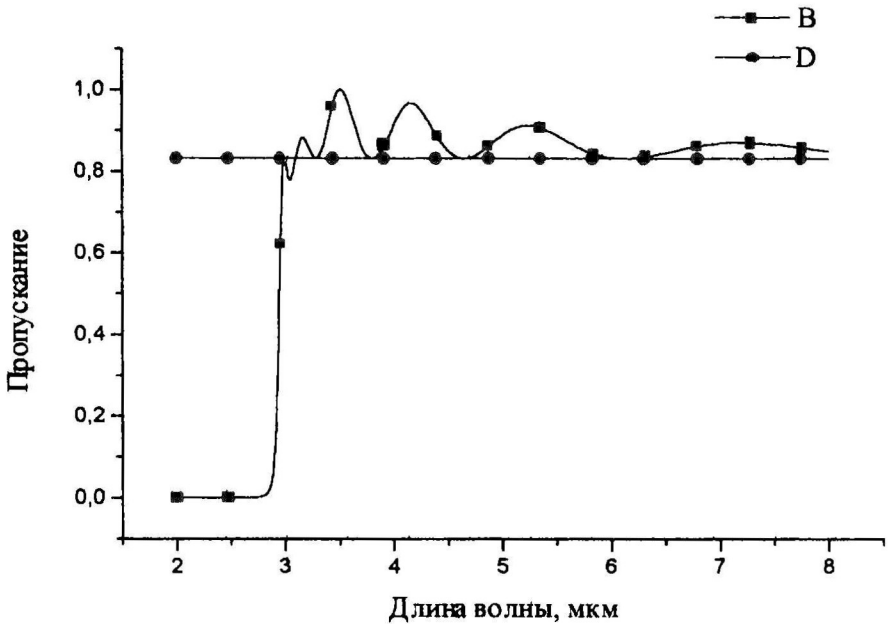


Рис. 2. Пропускание оптимизированного блокирующего фильтра (кривая В) на подложке из селенида цинка. Прямой линией С показана прозрачность подложки без покрытия.

Подобное “выглаживание” спектральных характеристик оказывается в большинстве случаев достаточным. В тех случаях, когда специальный выбор показателей преломления оказывается неудобным или недостаточным, приходится прибегать к варьированию толщин слоев. Эта процедура выполняется численно по специально составленным программам. Следует отметить, что полученное решение является наилучшим начальным приближением при проведении варьирования параметров системы.

Проведенный анализ позволил выявить особенности оптических свойств блокирующих фильтров при их работе в наклонных и сходящихся пучках излучения, что чрезвычайно важно в практических приложениях. Показано, что спектральные характеристики блокирующих фильтров сравнительно слабо зависят от угла наклона падающего излучения, т.е. фильтры способны работать в наклонных и сходящихся пучках. Таким образом, фильтры этого вида не требуют для своего применения каких-либо специальных условий, что в значительной степени упрощает их использование в приборостроении.

Во многих случаях материалы, используемые для создания интерференционных фильтров, не идеальны и обладают заметными потерями на поглощение и рассеяние. Потери также возникают из-за структуры слоев и связаны, в ряде случаев, с технологией получения фильтров. Поэтому нам представлялось важным оценить влияние малого поглощения на оптические свойства фильтров. Такое рассмотрение было специально проведено и показало, что малое поглощение в слоях слабо влияет на спектральные характеристики интерференционных систем, описывающих блокирующие фильтры.

В процессе работы были разработаны алгоритмы, методики и программы расчета и оптимизации спектральных характеристик интерференционных фильтров на ЭВМ, позволившие довести разработанную теорию до реальных технических приложений и использовать в разработках института.

**Третья глава** диссертации посвящена теории узкополосных фильтров, построенной на основе теории резонатора Фабри - Перо. Рассмотрены оптические свойства узкополосных фильтров, образованных системой диэлектрических слоёв, и полностью описаны их особенности.

Конструкция фильтра в операторной записи выглядит следующим образом:

$$D_0(HL)^m 2kH_s(LH)^m D,$$

здесь приняты следующие обозначения:  $D_0$  - исходная среда; H, L - четвертьволновые

слой соответственно с высоким ( $n_H = n_1$ ) и низким ( $n_L = n_2$ ) показателями преломления;  $2kH_s$  - центральный слой порядка  $k$  с показателем преломления  $n_s$ . Параметр  $m$  характеризует число слоев в диэлектрическом зеркале.

Проведенные исследования показали, что, вопреки сложившемуся мнению, правильный выбор показателя преломления резонансного слоя  $n_s$  очень важен. При нормальном падении излучения на фильтр величина  $n_s$  позволяет управлять полушириной полосы пропускания фильтра через изменение дисперсии фазы волны отраженной от диэлектрического зеркала внутри резонатора. Увеличение  $n_s$  приводит к уменьшению полуширины полосы прозрачности.

Правильный выбор материала для резонансного слоя позволяет стабилизировать положение полосы прозрачности фильтра при изменении его температуры. Изменение температуры фильтра приводит к изменению полосы пропускания за счет зависимости от температуры показателей преломления материалов слоев и толщины слоев. Исследование этого вопроса показало, что для диэлектрических зеркал это проявляется в изменении фазы при отражении. Коррекция изменения фазы для сохранения спектрального положения резонанса может быть произведена специальным выбором материала резонансного слоя. Изменение фазы при этом компенсируется коэффициентом линейного расширения и величиной  $dn/dT$  резонансного слоя. Полученное решение оказывается важным для практических приложений.

При наклонном падении излучения на фильтр оптические толщины всех слоев изменяются по общему правилу:

$$n_j h_j \Rightarrow n_j h_j \cos \vartheta_j$$

где  $\vartheta_j$  - угол преломления в  $j$ -ом слое,  $n_j$  и  $h_j$  показатель преломления и геометрическая толщина этого слоя.

Изменение оптической толщины всех слоев приводит к смещению полосы пропускания по спектру. Одновременно изменяются и фазы отраженных от зеркал

фильтра волн внутри резонатора. Изменения фаз для s- и p- компонент поляризации различны, что приводит к зависимости смещения полосы пропускания от поляризации падающего на фильтр излучения, т.е. к появлению дублетной структуры полосы прозрачности. Характерный вид дублетной структуры полосы прозрачности узкополосного фильтра, выполненного из слоев кремния и кварца, приведен на рисунке 3. Резонансный слой этого фильтра выполнен из кварца. Угол падения излучения на фильтр  $45^\circ$ .

Дублетная структура, показанная на этом рисунке, может быть устранена при условии изменения оптической толщины всех слоев таким образом, чтобы они оказывались четвертьволновыми при заданном угле падения излучения. По соображениям экспериментального характера это оказывается неудобным. Того же эффекта можно добиться при специальном выборе показателя преломления резонансного слоя, что показано на рисунке 4. В этом случае резонансный слой выполняется из материала с показателем преломления, равным 2.07. Таким материалом может быть оксид циркония с некоторыми добавками. Таким образом, правильный выбор величины  $n_s$  позволяет ликвидировать дублетную структуру полосы пропускания.

Более сложным оказывается случай работы фильтра в сходящемся пучке излучения. Сходящийся пучок легко представляется суммой лучей, падающих на фильтр под различными углами. Указанный выше выбор показателя преломления резонансного слоя только отчасти спасает положение, так как его выбор зависит от угла наклона. Рассмотрено два пути решения этой проблемы.

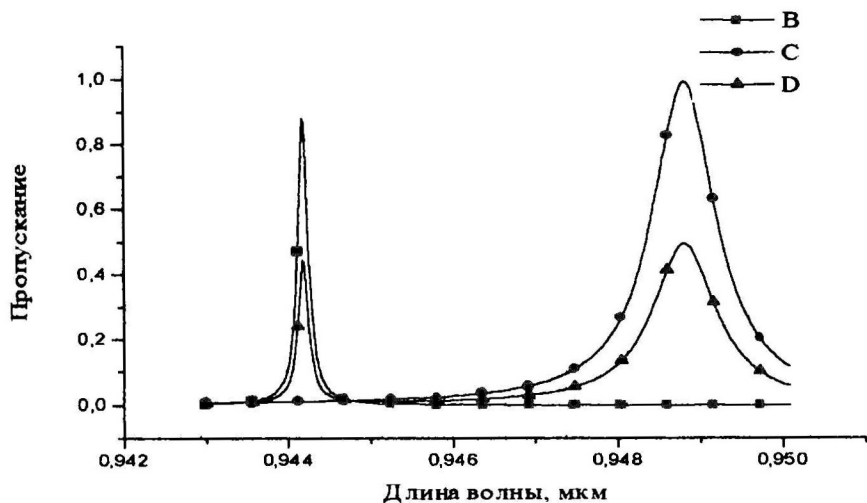


Рис. 3. Пропускание фильтра на основе слоев кремния и кварца, при угле падения  $45^\circ$ . Кривые: В – s- компонента, С – р-компонента и D – суммарная прозрачность.

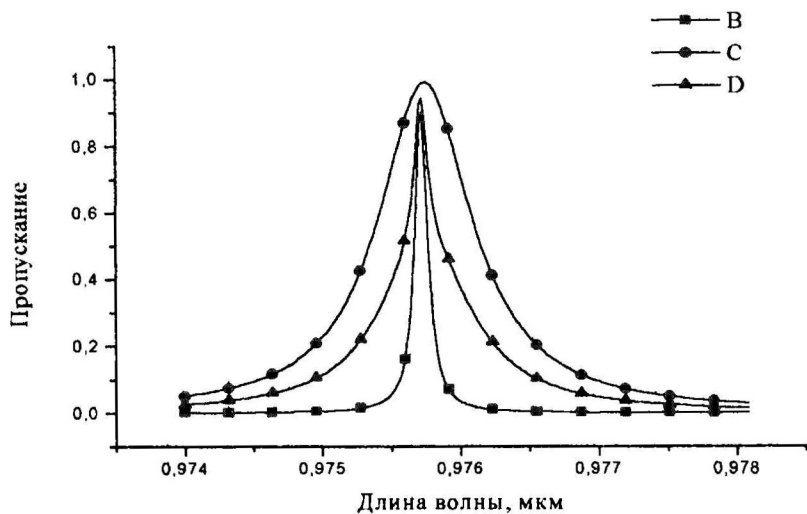


Рис. 4. Прозрачность фильтра на основе слоев кремния и кварца, показатель преломления резонансного слоя равен 2.07. Обозначения те же, что и на рис. 3.

Наиболее простой путь состоит в выборе всех слоев фильтра с достаточно высоким показателем преломления. В этом случае угол преломления в каждом слое оказывается малым и, соответственно, малы изменения оптической толщины всех слоев фильтра. Это означает малость смещения полосы прозрачности фильтра по спектру для всех углов, входящих в рассматриваемый сходящийся пучок. Подобный путь может быть использован только для фильтров, работающих в инфракрасной области спектра, где имеется широкий выбор полупроводниковых материалов очень большим показателем преломления. Можно, например, использовать теллурид висмута (показатель преломления около 10) и теллурид свинца (показатель преломления 5.4). При использовании этих материалов каких-либо существенных искажений полосы пропускания не наблюдается при углах схождения порядка 60–70 градусов.

Для коротковолновой области спектра этот путь не приемлем, так как в этом случае нет материалов с большим показателем преломления. Был предложен другой путь решения проблемы.

Пусть ось сходящегося пучка совпадает с нормалью к поверхности фильтра. Представляя этот пучок конусом с раствором  $2\alpha_k$ , плоскую поверхность фильтра можно разбить на кольцевые зоны, на которые падают плоские волны под углом  $\alpha$ . Каждая зона описывается радиусом  $r$ , соответствующим углу  $\alpha$ . Если выбирать распределение толщины каждого слоя фильтра, в соответствии с выделяемыми зонами, по закону:

$$h_j = h_j^0 \left[ 1 - \frac{n_0^2}{n_j^2} \frac{r^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_k}{r_k^2 + r^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_k} \right]^{-\frac{1}{2}},$$

где  $h_j^0$  – толщина  $j$ -го слоя, рассчитанная для нормального падения излучения, тогда не будет смещения полосы пропускания фильтра по спектру, т.е. фильтр в сходящемся пучке будет работать почти также, как при нормальном падении излучения.

Экспериментальные исследования показали, что спектральные свойства узкополосных фильтров Фабри – Перо в значительной степени зависят от микрошероховатости поверхностей подложки и слоев. Оценка микрошероховатости поверхности подложки может быть выполнена по величине диффузного рассеяния зондирующего излучения. Измерения, проводившиеся нами, показали, что только в самом лучшем случае на полированной поверхности достигается величина микрошероховатости, равная  $10\text{Å}$ . В большинстве случаев эта величина на порядок выше. При нанесении тонких пленок микрогеометрия поверхности не воспроизводится. Воспроизводятся только крупные дефекты поверхности.

При теоретическом рассмотрении задач оптики тонких пленок всегда предполагается идеальность поверхностей, что физически не должно соответствовать действительности. Шероховатые поверхности пленки означают флуктуации её толщины. При толщине пленки порядка  $700\text{Å}$  пренебрегать флуктуациями толщины порядка  $50\text{Å}$  недопустимо. При рассмотрении оптических свойств большинства покрытий флуктуации в толщинах слоев проявляются не очень заметно. В резонансных системах, к которым относятся фильтры Фабри – Перо, флуктуации сказываются значительно.

На рисунке 5 показано, как изменяется положение максимума прозрачности узкополосного фильтра, помещенного на входную щель спектрографа. Из рисунка видно, что есть два рода смещения. Некоторый общий градиент, возникающий от неоднородности распределения пленки по поверхности подложки, и хаотические изменения положения максимальной прозрачности, возникающие за счет флуктуаций толщины резонансного слоя.



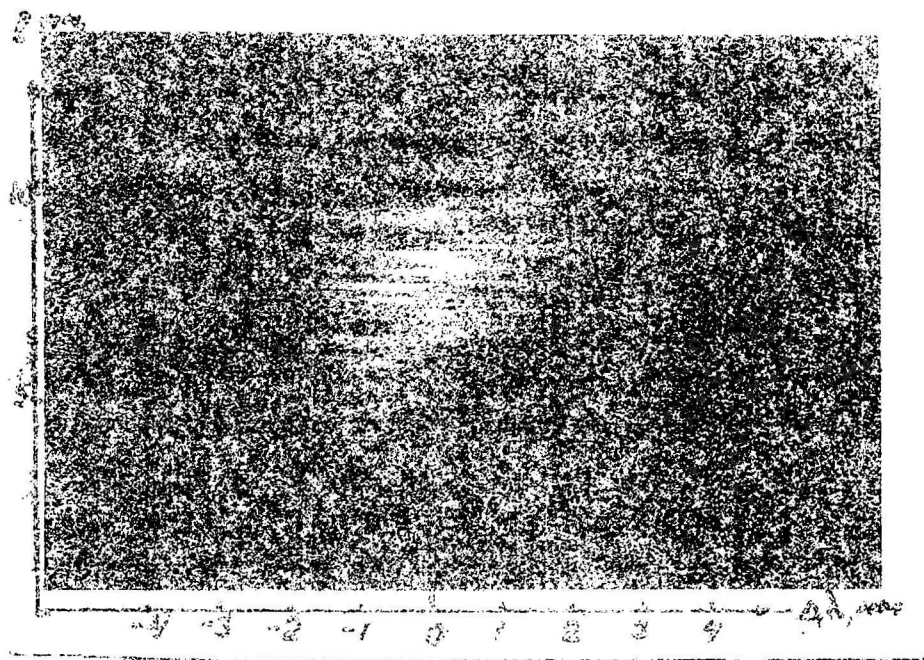


Рис. 5. Пропускание узкополосного фильтра, помещенного на входную щель спектрографа.

Проведена оценка влияния флуктуации толщины центрального (резонансного) слоя на оптические свойства фильтра. Флуктуации в других слоях системы не учитывались для получения простого и ясного выражения, описывающего физическую картину. Пропускание фильтра в этом случае можно описать выражением:

$$T = K \frac{T_1 T_2 e^{-\alpha}}{1 + R_1 R_2 e^{-2(\alpha+\epsilon)} - 2\sqrt{R_1 R_2} e^{-(\alpha+\epsilon)} \cos(2g\varphi - \Delta_1 - \Delta_2)}.$$

$$K = \frac{1 - R_1 R_2 e^{-2(\alpha + \varepsilon)}}{1 - R_1 R_2 e^{-2\alpha}}$$

где  $\varphi = \pi \lambda_0 / 2\lambda$ ,  $\lambda_0$  – положение максимума,  $\lambda$  – текущую длину волны,  $g$  – толщина слоя диэлектрика в долях четверти длины эталонной волны  $\lambda_0$ ,  $\varepsilon = 1.18g\varphi\Delta h/h$ ,  $h$  – геометрическая толщина слоя диэлектрика, а  $\Delta h$  – суммарная средняя шероховатость границ диэлектрической пленки,  $R_j$  – коэффициенты отражения зеркал,  $\Delta_j$  – фазы,  $\alpha$  – поглощение в слое.

Видно, что величина максимума пропускания уменьшается, а полуширина спектральной прозрачности возрастает. Локальные флуктуации толщины приводят к смещениям максимума пропускания фильтра, что наглядно продемонстрировано на рисунке 5.

Для фильтров Фабри - Перо можно использовать металлические зеркала, что ранее и применялось. Такие фильтры не требуют изготовления дополнительных блокирующих систем, а гашение полос высших порядков легко проводится выбором подложек. Основными недостатками этих фильтров являются низкое пропускание в максимуме (не более 30%) и сравнительно большая спектральная ширина полосы прозрачности. Это связано с поглощением излучения в металлических зеркалах фильтра. Возможно использовать и иной путь применения металлических слоев для получения узкополосного фильтра. Если поместить слой металла в узел стоячей волны внутри фильтра Фабри - Перо с диэлектрическими зеркалами, то можно сохранить прозрачность фильтра на высоком уровне при практически полном подавлении крыльев прозрачности. Параметры резонатора должны быть согласованы с введенным слоем металла.

Проведено исследование таких фильтров, которое показало, что, кроме высокой прозрачности, при этом возможно и значительное уменьшение спектральной ширины полосы пропускания. Уменьшение полуширины фильтра достигается при

этом за счет дисперсии фазы и значительного поглощения слоя металла при нарушении условия его размещения в узле стоячей волны. Из физических соображений ясно, что для получения эффекта необходимо выбирать металл с действительной частью комплексного показателя преломления значительно меньшей 1. В этом случае оптическая толщина слоя металла мала. В качестве примера на рисунке 6 приведена спектральная характеристика прозрачности фильтра на основе пленки серебра.

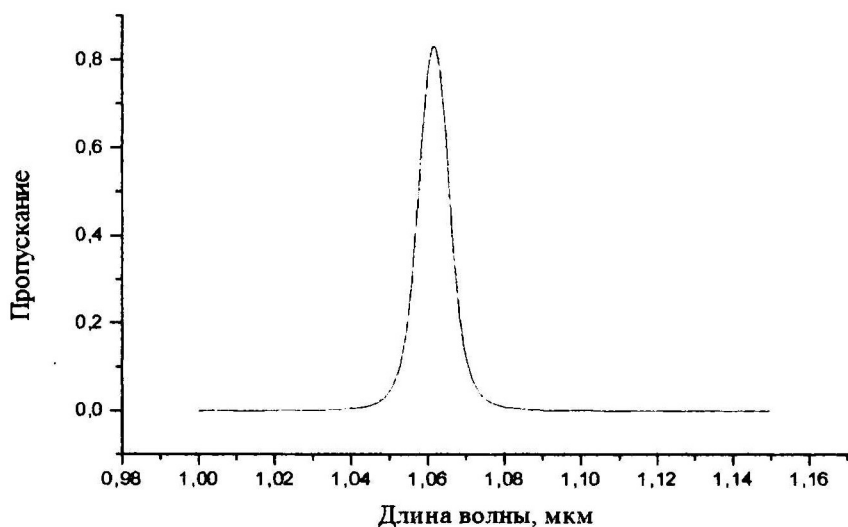


Рис 6. Спектральная прозрачность фильтра с индуцированным пропусканием на основе пленки серебра.

Из рисунка следует, что оптические характеристики фильтра с индуцированным пропусканием могут считаться вполне удовлетворительными. К сожалению, следует отметить, что эти фильтры очень чувствительны к флуктуациям толщины слоя

диэлектрика, окружающего металлический слой, и к углам падения излучения на фильтр.

**Четвертая глава** диссертации посвящена анализу методик расчета оптических постоянных тонких пленок. Без этих данных невозможно конструирование любых интерференционных покрытий.

Были разработаны методики расчета оптических постоянных тонких пленок на основе фотометрических измерений прозрачности отдельных диэлектрических пленок, основанные на использовании огибающих к функции спектрального пропускания. Характерный пример приведен на рисунке 7. Описание огибающих к спектральной кривой прозрачности тонкой пленки позволяет находить показатель преломления материала пленки и оценивать суммарные потери на поглощение и рассеяние.

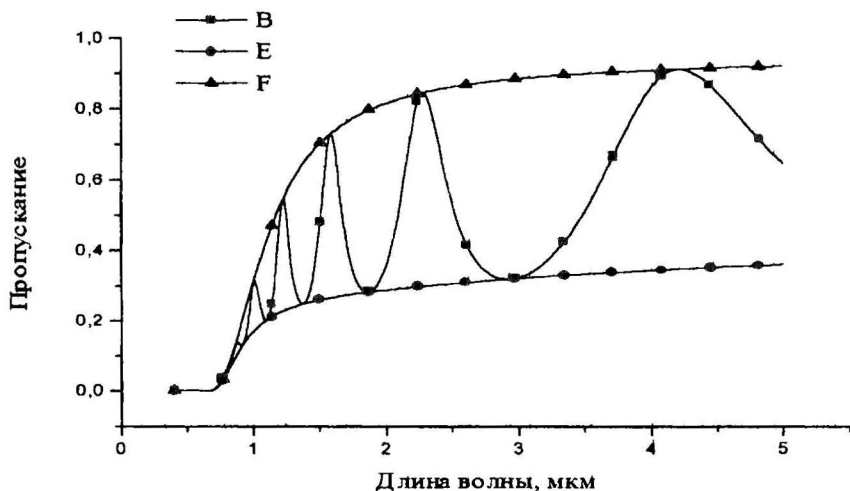


Рис. 7. Пропускание пленки германия оптической толщиной 2,5 мкм (кривая В) и огибающие к ней (кривые Е и F)

В большинстве случаев диэлектрические пленки обладают малым поглощением в интересующей практиков области спектра, поэтому использование только стандартных фотометрических измерений прозрачности оказывается достаточно. Только в резонансных системах малые потери оказывают существенное влияние на оптические характеристики и, в этом случае, указанной методики оказывается недостаточно.

Микрогеометрия поверхности пленки оценивается по рассеянию излучения падающей световой волны. Дополнительные данные для определения поглощения появляются из эллипсометрических измерений той же пленки с использованием методики МНПВО, обладающей высокой чувствительностью. По уравнениям для огибающих и данным эллипсометрических измерений, включаемым в общую систему уравнений, легко находятся все необходимые параметры пленки.

Для исследования оптических свойств металлических пленок были разработаны специальные фотометрические и эллипсометрические методики, что позволило уверенно находить оптические постоянные тонких пленок металлов. Наши эксперименты показали, что оптические свойства тонких пленок металлов сильно зависят от их структуры и методов получения. Именно поэтому важны разработанные нами методики.

**В пятой главе** рассматриваются вопросы оценки качества обработки подложек, важные для изготовления узкополосных фильтров.

В процессах обработки подложек перед нанесением покрытия проявляются три основных момента:

- шероховатость поверхности, приводящая при нанесении покрытия к появлению флуктуаций толщины слоя;
- значительная толщина нарушенного процессом обработки слоя на поверхности подложки, приводящая к значительным флуктуациям электрического рельефа;
- недостаточная очистка поверхности перед нанесением покрытия.

В настоящей главе рассмотрена задача оценки качества обработки поверхности подложки, не затрагивая процессов её очистки.

Величина шероховатости поверхности может быть достаточно полно описана среднегеометрической величиной неровности. Для полированных поверхностей эту величину можно определить измерением светорассеяния. Наиболее удобно использовать для этой цели лазерные методы. В случае поглощающей подложки интегральное рассеяние на её поверхности, измеряемое в фотометрическом шаре, даёт величину среднегеометрической шероховатости при малых  $\eta$  ( $\eta/\lambda \ll 1$ ):

$$\eta = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{\rho}{R}},$$

где  $\rho$  – диффузное отражение,  $R$  зеркальное отражение,  $\eta$  – среднегеометрическая величина шероховатости,  $\lambda$  – длина волны, на которой проводятся измерения.

Если подложка на длине волны измерения прозрачна, то необходимо выполнить измерения диффузного отражения на обеих сторонах, величины же среднегеометрической шероховатости в этом случае определяются из решения двух линейных уравнений:

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2 R \left[ \left(1 + n \frac{R}{1+R}\right)^2 \eta_1^2 + \frac{n^2}{(1+R)^2} \eta_2^2 \right] \\ \rho_2 &= \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2 R \left[ \left(1 + n \frac{R}{1+R}\right)^2 \eta_2^2 + \frac{n^2}{(1+R)^2} \eta_1^2 \right], \end{aligned}$$

$R$  – коэффициент зеркального отражения от одной поверхности, равный  $(n-1)^2/(n+1)^2$ , где  $n$  – показатель преломления подложки,  $\eta_i$  – среднегеометрическая шероховатость  $i$ -ой поверхности,  $\rho_i$  – диффузное отражение на ней.

Для оценки величины нарушенного механической обработкой слоя была разработана модель флуктуационного изменения показателя преломления в

нарушенном слое, так как шлифовка и полировка - процессы стохастические по своей природе, то изменения физических свойств материала в приповерхностной области носят флуктуационный характер. Разработана методика оценки этих нарушений.

Показатель преломления в нарушенном слое представлен в виде:

$$n - ik = n_0 - ik_0 + f,$$

$$\text{где } f = (a - ia_1)e^{-\frac{x}{L_1}} + (b - ib_1)e^{-\frac{x}{L_2}} + (a_2 - ib_2)e^{-\frac{x}{L_3}}.$$

Здесь  $f$  – флуктуирующая часть показателя преломления. Величины  $a$  и  $a_1$  описывают изменение комплексного показателя преломления за счет пластической деформации при обработке; величины  $b$ ,  $b_1$  – аналогичные величины, возникающие за счет внутренних напряжений сжатия;  $a_2$ ,  $b_2$  – чисто флуктуационная добавка, обязанная как упругим, так и пластическим процессам.  $L_j$  – соответствующие характерные длины, описывающие глубину нарушенного слоя.

Все оценки параметров основаны на эллипсометрических измерениях при нескольких углах падения излучения. Разработанная методика позволяет получить количественное описание параметров, характеризующих нарушенный слой, что позволяет использовать её в целях контроля технологических процессов изготовления и подготовки поверхности подложки для изготовления качественных фильтров.

**В шестой главе** рассматриваются некоторые вопросы технологии нанесения интерференционных покрытий.

При изготовлении многослойных интерференционных покрытий на оптических деталях контроль процесса и связанные с ним проблемы воспроизводимости и устойчивости были и остаются решающими факторами в определении качества и экономичности производства, особенно, если это производство крупных серий. Общее рассмотрение технологии нанесения покрытий не входило в нашу задачу

из-за чрезвычайной сложности и большого объема. В настоящей главе рассматриваются только вопросы контроля толщин слоев и флуктуаций в толщине слоёв. Специально рассмотрен вопрос об автоматизации технологического процесса нанесения интерференционных покрытий, реализация которого была нами осуществлена.

При решении задач равномерности нанесения интерференционного покрытия на подложку обычно предполагается, что процесс испарения строго равномерен и постоянен. В реальной ситуации это не так, что приводит к появлению флуктуаций толщин слоев на подложке. Кроме того, момент прекращения процесса нанесения слоя не произволен (только по достижению заданной толщины на контролируемой поверхности), а должен подчиняться определенным условиям симметрии. В распространенной практике нанесения покрытий это условие обычно игнорируется. Выполненный анализ показал, что игнорирование условий симметрии приводит к появлению флуктуаций толщины слоя на подложке.

Важным моментом в изготовлении качественного интерференционного покрытия является точность контроля толщины каждого слоя в процессе его нанесения. Была разработана модель изменения оптических свойств интерференционного покрытия с ростом очередного слоя при учете ошибок во всех предыдущих слоях. Проанализированы возможные источники появления ошибок и показано, что их величина может быть минимизирована. Найдены методики минимизации ошибок в контроле, и сформулирована методика автоматизации процесса нанесения многослойных интерференционных покрытий, которая нами реализована на вакуумной установке ВУ-1.

**Основные результаты** настоящей работы можно сформулировать следующим образом:

1. Разработана общая методика расчета оптических свойств интерференционных покрытий произвольной структуры. Созданы алгоритмы и программы расчета и



оптимизации интерференционных фильтров, позволившие довести все теоретические разработки до реальных технических приложений.

2. Проведен анализ фильтрации излучения оптической системой:

- показаны и обоснованы требования к интерференционным фильтрующим системам;
- впервые показана фильтрация излучения системой поверхностей с просветляющими покрытиями, что имеет особо важное значение для техники, работающей в инфракрасной области спектра и использующей материалы с большими показателями преломления;
- решены конкретные задачи, нашедшие применение в современном приборостроении.

3. Развита теоретический подход к синтезу просветляющих интерференционных покрытий:

- проанализирована возможность и осуществлено просветление поверхности германия симметричной системой слоев с суммарной оптической толщиной, меньшей четверти длины волны;
- проанализированы и использованы аналитические свойства спектральной характеристики прозрачности интерференционного покрытия для синтеза просветляющих покрытий.

4. На основе разработанной теории блокирующих интерференционных фильтров:

- проведено полное исследование спектральных и угловых свойств блокирующих фильтров и оптимизированы их спектральные характеристики;
- впервые показано, что поглощение излучения в слоях блокирующего интерференционного фильтра слабо влияет на его спектральные характеристики.

5. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование узкополосных диэлектрических и металлодиэлектрических интерференционных фильтров:

- показано, что прозрачность в максимуме пропускания для металлодиэлектрических

систем может быть достаточно высокой и практически очень близкой к прозрачности чисто диэлектрических систем;

- разработана методика расчета и оптимизации спектральных свойств фильтра в наклонных и сходящихся пучках падающего излучения, что позволяет правильно оценить положение фильтра в оптической системе;
- разработан метод исключения дублетной структуры полосы пропускания узкополосного фильтра при наклонном падении излучения;
- разработана методика расчета и подбора материалов для исключения температурной зависимости положения полосы пропускания диэлектрического интерференционного фильтра в заданном интервале температур;
- исследованы оптические свойства узкополосных фильтров с шероховатыми границами раздела. Показано, что такие резонансные системы очень чувствительны к качеству граничных поверхностей.

6. Теоретически изучен и создан уникальный интерференционный фильтр с глубоким подавлением фоновой прозрачности на уровне  $10^{-8} \div 10^{-10}$ .

7. Разработаны высокоэффективные методики расчета оптических постоянных тонких интерференционных пленок, основанные на построении огибающих к спектральной прозрачности. Показано, что сочетание методов многоугловой эллипсометрии и полного внутреннего отражения позволяет проводить измерение малого поглощения тонкой пленки в области ее высокой прозрачности.

8. Создана математическая модель нарушенного слоя на поверхности массивного материала, возникающего за счет механического воздействия при получении оптической поверхности. На основе этой модели оптимизированы методы обработки подложек, предназначенных для изготовления фильтрующих систем.

9. Разработаны математические модели для описания метода оптического контроля толщин многослойных интерференционных пленок в процессе их роста. Разработанные модельные представления позволили выявить источники флуктуаций толщин отдельных слоев и автоматизировать процесс нанесения многослойного покрытия.

**Список основных публикаций по теме диссертации.**

1. Несмелов Е.А., Конюхов Г.П. К расчету коэффициентов отражения и пропускания света тонкослойным интерференционным покрытием. //ОМП, 1961, № 10, стр. 10-12.
2. Гисин М.А., Несмелов Е.А. Интерференционные светофильтры, пропускающие коротковолновую и отражающие длинноволновую области спектра. //Оптика и спектроскопия, 1963, Т. 14, вып. 3, стр.395-400.
3. Конюхов Г.П., Несмелов Е.А., Валидов М.А., Гайнутдинов И.С. Зависимость полуширины пропускания узкополосных интерференционных светофильтров от показателя преломления центрального слоя. //ЖПС, 1967, Т. 7, вып. 5, стр. 771-772.
4. Кард П., Несмелов Е., Конюхов Г. Теория четвертьволнового отрезающего фильтра. // Известия АН ЭССР 1968, т.17, №3, стр.314-323.
5. Конюхов Г.П., Несмелов Е.А. К теории диэлектрического узкополосного светофильтра. //ЖПС, 1969, Т.11, вып. 3, стр. 468-474.
6. Гисин М.А., Конюхов Г.П., Несмелов Е.А. Методика расчета оптических характеристик отрезающих интерференционных фильтров с учетом поглощения в слоях. //Оптика и спектроскопия, 1969, Т.26, вып.4, стр.651-653
7. Кард П., Несмелов Е., Конюхов Г., Иванов В. Просветление трехслойным симметричным покрытием. //Известия АН Эстонской ССР, 1969, т.18, N 2, стр. 186-192.
8. Несмелов Е.А., Конюхов Г.П. Об одной методике конструирования тонкослойных интерференционных систем. //ЖПС 1969, Т.10, № 4, стр.630-633
9. Несмелов Е.А., Конюхов Г.П. К теории отрезающих фильтров. //ЖПС, 1969, Т. 11, вып. 4, стр. 700-703.
10. Несмелов Е.А., Белашова Л.В., Орлова Л.Г. Оптические свойства пленок молибдена. //Тезисы доклада на VII Симпозиуме по физическим свойствам и

электронному строению переходных металлов, их сплавов и соединений. Киев, 1969, стр.50

11. Несмелов Е.А., Завада Л.С. Оптические свойства пленок родия. //Тезисы доклада на VII Симпозиуме по физическим свойствам и электронному строению переходных металлов, их сплавов и соединений. Киев, 1969, стр.51

12. Несмелов Е.А. Исследование оптических свойств многослойных интерференционных спектроделителей. Автореферат диссертации, Минск 1969

13. Несмелов Е.А., Конюхов Г.П. Интерференционный светофильтр. А.с. 384090. Заявл. 27.09.71. Оpubл. 23.05.73. МКИ G02b 5/26. Бюлл. № 24.

14. Несмелов Е.А., Конюхов Г.П. К теории отрезающих интерференционных фильтров. //Оптика и спектроскопия, 1971, Т.31, вып.1, стр. 133-137.

15. Конюхов Г.П., Несмелов Е.А. Повышение прозрачности узкополосного светофильтра типа Фабри – Перо. //Оптика и спектроскопия, 1972, Т. 32, вып. 3, стр. 601-606.

16. Лазарева Л.Д., Несмелов Е.А. Влияние термообработки на положение максимума прозрачности интерференционных фильтров. // ЖПС, 1972, Т.16, вып. 1, с.143-147.

17. Несмелов Е.А., Белашова Л.В., Орлова Л.Г. Оптические свойства пленок молибдена. //Сб. Электронное строение и физические свойства твердого тела. Киев, Наукова думка, 1972, стр.

18. Несмелов Е.А., Завада Л.С. Оптические свойства пленок родия. //Сб. Электронное строение и физические свойства твердого тела. Киев, Наукова думка, 1972, стр.

19. Белашова Л.В., Несмелов Е.А., Тальдаев Э.Т. Об увеличении механической прочности и адгезии к подложке металлических пленок, полученных термическим испарением в вакууме.//Тезисы докладов V Всесоюзной научно-технической конференции “Новые разработки и исследования струйных, механических, электрофизических, сорбционных и других типов вакуумных насосов” Казань, 1972, с.97-98

20. Конюхов Г.П., Несмелов Е.А. О просветлении отрезающего фильтра в заданной точке спектра. // Оптика и спектроскопия, 1973, т.34, вып.5, стр.976 - 981
21. Полионский В.Б., Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А. Полосовые интерференционные фильтры на основе пленок германия и моноксиды кремния. // Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Теория и практика алмазной и абразивной обработки деталей приборов и машин", проведенной в МВТУ им. Н. Э. Баумана 11-13 декабря 1973г., стр. 45-46.
22. Лазарева Л.Д., Несмелов Е.А., Ахмадеев М.Х. Влияние внешних воздействий на локальную прозрачность узкополосных фильтров. //ЖПС, 1974, Т. 20, вып. 6, стр. 1071-1075.
23. Абуков А.А., Ермолаев Ю.П., Несмелов Е.А. Равномерность пленок на больших поверхностях осаждения при подвижном испарителе. Тезисы доклада на научно-технической конференции по микроэлектронике, Казань, 1975, стр. 56-57
24. Лазарева Л.Д., Несмелов Е.А., Панасенко Б.В., Тагиров Р.Б. Эволюция тонкой пленки непосредственно после её изготовления. //Сборник аспирантских работ. Точные науки. Физика. Ч. 2. Изд. КГУ, 1977, стр. 20-23
25. Несмелов Е.А., Залилова Н.Е., Гайнутдинов И.С. Защитные покрытия для гигроскопичных кристаллов NaCl и KCl. //Тезисы доклада 1 отраслевого совещания по совершенствованию технологии оптических покрытий. ЦНИИ информации, М. 1977
26. Марков Ю.Н., Несмелов Е.А., Гайнутдинов И.С. Метод синтеза ахроматических просветляющих и светоделительных покрытий. // Оптика и спектроскопия, 1979, т. 46, вып. 1, стр. 158-161
27. Марков Ю.Н., Несмелов Е.А., Никитин А.С., Гайнутдинов И.С. К вопросу оптимизации полосовых интерференционных фильтров. // ЖПС, 1980, т.33, вып.3, стр.536-540
28. Марков Ю.Н., Несмелов Е.А., Гайнутдинов И.С. Аналитическое исследование

полосовых интерференционных фильтров. // Оптика и спектроскопия, 1980, т.49, вып.5, стр.990 - 997

29. Панасенко Б.В., Гусев А.Г., Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Тагиров Р.Б. Расчет оптических постоянных тонких пленок с учетом шероховатости поверхности и ширины спектра зондирующего излучения. //ЖПС, 1980, Т.32, вып.4, с. 681-683.

30. Панасенко Б.В., Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Тагиров Р.Б. Влияние сорбции атмосферной влаги на оптические свойства тонких диэлектрических пленок. //ЖПС, 1980, Т. 32, вып. 1, стр. 172-174.

31. Фазылзянов Р.Х., Панасенко Б.В., Несмелов Е.А., Тагиров Р.Б. Влияние давления остаточных газов на контроль толщины тонких пленок. //ОМП, 1980, № 7, с. 36-37

32. Несмелов Е.А., Митропольский Э.Р., Карпюк Г.М., Свойства зеркал, Аналитический обзор N 2723, Казань 1980, 140 с.

33. Панасенко Б.В., Несмелов Е.А., Тагиров Р.Б. Влияние давления остаточных газов на оптические свойства тонких пленок. //ОМП, 1980, № 1, стр.25-28

34. Панасенко Б.В., Несмелов Е.А., Тагиров Р.Б. Влияние давления остаточных газов на оптические свойства тонких плёнок. // ОМП, 1980, вып. 1, стр. 25-28.

35. Конюхов Г.П., Матшина Н.П., Несмелов Е.А. Программа расчета спектральных характеристик тонкослойных интерференционных покрытий. //Сборник тезисов докладов "Состояние и перспективы развития исследований и разработок в области оптических покрытий." М. ЦНИИ информации, 1981, с.30.

36. Матшина Н.П., Несмелов Е.А. и др. О математическом моделировании метода оптического контроля толщин слоев при создании интерференционных покрытий. Депонировано в орг. п/я А-1420, 1982, № ДР0767

37. Несмелов Е.А., Никитин А.С., Гусев А.Г., Иванов О.Н. Измерение энергии адгезии тонких пленок. //ОМП, 1982, № 10, стр. 34-37

38. Гусев А.Г., Несмелов Е.А., Никитин А.С., Гайнутдинов И.С. Внутренние напряжения в тонких пленках Ge. ZnS, ZnSe. //ОМП, 1982, № 8, стр. 35-37

39. Конюхов Г.П., Матшина Н.П., Несмелов Е.А., Тагиров Р.Б. Расчет спектральных характеристик многослойных интерференционных систем. – Казань 1983, 34 с. Деп. В ВИНТИ № 4341-83
40. Матшина Н.П., Несмелов Е.А. и др. Моделирование метода оптического контроля толщины слоев интерференционного покрытия с учетом потерь на поглощение. Депонировано в ВИНТИ, № 4340-83
41. Конюхов Г.П., Несмелов Е.А., Тагиров Р.Б. Узкополосные фильтры для сходящегося пучка излучения. //Оптика и спектроскопия, 1983, Т. 55, вып. 4, стр. 757-760.
42. Конюхов Г.П., Несмелов Е.А. Оценка влияния шероховатости границ слоев на оптические свойства узкополосных фильтров.//Тезисы докладов всесоюзного научного семинара “Методы синтеза и применение многослойных интерференционных систем” Москва, 18-19 апреля 1984 г., стр. 65
43. Марков Ю.Н., Никитин А.С., Гусев А.Г., Несмелов Е.А. Метод поиска глобального минимума в задаче синтеза интерференционных покрытий.//Тезисы доклада всесоюзного научного семинара “Методы синтеза и применение многослойных интерференционных систем”. Москва, 18-19 апреля 1984г, с.13-14.
44. Несмелов Е.А., Конюхов Г.П., Матшина Н.П. Математическое моделирование процесса контроля толщин слоев интерференционных покрытий. //Тезисы докладов Всесоюзного научного семинара “Методы синтеза и применение многослойных интерференционных систем” М. Изд. МГУ, 1984, стр.76
45. Несмелов Е.А., Конюхов Г.П., Карпюк Г.М. Многослойные интерференционные узкополосные светофильтры. Аналитический обзор № 3682. М. ЦНИИИТЭИ, 1984, 129 с.
46. Несмелов Е.А., Лазарева Л.Д., Гусев А.Г. Зависимость свойств пленок ZnS от скорости осаждения. // ЖПС, 1984, т. 40, вып. 1, стр. 136-139
47. Несмелов Е.А., Гусев А.Г., Иванов О.Н., Валидов Р.М. Коэффициенты линейного

расширения плёнок. //ОМП, 1986, вып. 9, стр. 50-52

48. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Мухамедяров Р.Д. и др. Авторское свидетельство № 240831, опубликовано 1.08.1986

49. Несмелов Е.А., Афанасьева А.Г., Соболева Н.Н., Матшина Н.П., Конюхов Г.П., Никитин А.С. О возможности создания интерференционных зеркал, работающих в спектральной области вакуумного ультрафиолета. //Тезисы докладов VII Всесоюзной конференции по физике вакуумного ультрафиолета и его взаимодействию с веществом ВУФ-86, Эзэрниэки, 5-7 мая 1986, стр. 188.

50. Афанасьева А.Г., Гусев А.Г., Несмелов Е.А., Никитин А.С. Оценка неоднородности тонких диэлектрических пленок методом эллипсометрии. //ЖПС, 1987, т. 46, № 4, стр. 675-678

51. Несмелов Е.А., Матшина Н.П., Конюхов Г.П., Гусев А.Г. Математическое моделирование метода оптического контроля толщин слоёв интерференционного покрытия. //ОМП, 1987, вып. 6, стр. 14-15

52. Афанасьева А.Г., Матшина Н.П., Несмелов Е.А. Математическая модель и программное обеспечение оценки качества полировки оптических деталей и чистоты поверхности методом эллипсометрии. //Тезисы доклада на I Отраслевом семинаре "Автоматизация оптических приборов" Ленинград, 1987, с. 20

53. Афанасьева А.Г., Гусев А.Г., Несмелов Е.А. Математическая модель оценки статистических характеристик шероховатости плоских оптических деталей по величине интегрального рассеяния. //Тезисы доклада на I Отраслевом семинаре "Автоматизация оптических приборов" Ленинград, 1987, с. 21-22

54. Несмелов Е.А., Гусев А.Г., Матшина Н.П., Карпюк Г.М. Автоматизация процесса изготовления оптических покрытий испарением и конденсацией материалов в вакууме. Аналитический обзор за 1980-1987 гг. № 4618. М. ЦНИИИ и ТЭИ, 1988, 40 стр.

55. Афанасьева А.Г., Матшина Н.П., Несмелов Е.А. Определение качества обработки



- оптических поверхностей сочетанием фотометрических и эллисометрических методов. //Тезисы доклада 7 Всесоюзной научно-технической конференции “Фотометрия и ее метрологическое обеспечение”, М. 1988, стр.259
56. Гусев А.Г., Несмелов Е.А. Автоматизация контроля оптических толщин пленок в процессе нанесения интерференционных покрытий. //ОМП, 1989, № 9, с. 34-36
57. Алиакберов Р.Д., Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А. Исследование оптической неоднородности тонких слоев двуокиси циркония методом эллисометрии. //Доклад на 4-ой Всесоюзной конференции “Эллисометрия – метод исследования поверхности твердых тел”, Новосибирск, 1989
58. Гавриленко О.Ф., Несмелов Е.А., Сабиров Р.С. Применение эллисометрического метода к исследованию процесса отжига полированных поверхностей щелочно-галоидных кристаллов. //Доклад на 4-ой Всесоюзной конференции “Эллисометрия – метод исследования поверхности твердых тел”, Новосибирск, 1989
59. Несмелов Е.А., Матшина Н.П. Эллисометрия реальной поверхности прозрачных материалов. //Доклад на 4-й Всесоюзной конференции “Эллисометрия – метод исследования поверхности твердых тел”, Новосибирск, 1989
60. Афанасьева А.Г., Борисов А.Н., Матшина Н.П., Несмелов Е.А. Определение малого поглощения в тонких диэлектрических пленках методом эллисометрии. // ЖПС, 1989, т. 50, № 6, стр. 1004-1007
61. Несмелов Е.А., Матшина Н.П., Карпок Г.М. Расчёт оптических постоянных тонких плёнок. Аналитический обзор за 1980 – 1988 гг. № 4983, М. ЦНИИИИи ТЭИ, 1990, 73 стр.
62. Соболева Н.Н., Несмелов Е.А., Матшина Н.П., Конюхов Г.П. Влияние сходимости падающего пучка излучения на значения спектральных характеристик интерференционных покрытий. //ЖПС, 1990, Т. 53, вып. 4, стр. 606-611.
63. Гусев А.Г., Афанасьева А.Г., Валидов Р.М., Несмелов Е.А. Оптико-физи-ческие

свойства пленок фторида висмута. //ОМП, 1990, № 5, стр. 55-57

64. Афанасьева А.Г., Гавриленко О.Ф., Матшина Н.П., Несмелов Е.А. Определение параметров нарушенного слоя и степени загрязненности полированной поверхности прозрачных материалов. //Оптика и спектроскопия, 1990, т.69, вып.5, стр.1145-1150

65. Кобелев С.В., Несмелов Е.А., Голота А.Ф., Кузнецова Л.В. Влияние отжига на оптические свойства пленок  $MgAl_2O_4$ . //ОМП, 1990, № 3, стр. 51-53

66. Гавриленко О.Ф., Гужов А.А., Несмелов Е.А., Сабиров Р.С. Пассивация поверхностей щелочно-галоидных кристаллов высокотемпературным отжигом. // Поверхность, 1990, вып.9, стр.129-134

67. Несмелов Е.А. К теории узкополосных металлодиэлектрических фильтров. // Тезисы докладов Всесоюзного семинара "Оптические покрытия", М.1991, с. 64-65

68. Несмелов Е.А., Сафин Р.Г. Неоднородность тонких пленок и её проявление в оптических свойствах. //Тезисы докладов семинара "Оптические покрытия", М. 1991, стр. 33-34.

69. Биряльцева А.Р., Несмелов Е.А., Сафин Р.Г. Эллипсометрическое определение параметров неоднородности тонких диэлектрических пленок. //Тезисы доклада Всесоюзного семинара "оптические покрытия", М. 1991, стр. 66-67

70. Несмелов Е.А., Сафин Р.Г. Неоднородность тонких пленок и её проявление в оптических свойствах. //Тезисы доклада Всесоюзного семинара "оптические покрытия", М. 1991, стр. 90

71.Биряльцева А.Р., Матшина Н.П., Несмелов Е.А. Эллипсометрическое определение оптических свойств локально неоднородных тонких пленок.//Тезисы доклада VI Всесоюзного совещания "Применение металлоорганических соединений для получения неорганических покрытий и материалов". Н. Новгород, 1991,с.101-102.

72. Матшина Н.П., Несмелов Е.А., Гусев А.Г., Сафин Р.Г. Модель связи микроструктуры пленок и их оптических свойств.//Тезисы докладов VI Всесоюзного совещания "Применение металлоорганических соединений для получения

неорганических покрытий и материалов" Нижний Новгород, 1991, с.99-100

73. Матшина Н.П., Несмелов Е.А., Нагимов И.Х., Валидов Р.М., Соболева Н.Н. К теории узкополосных фильтров с индуцированным пропусканием. //ЖПС, 1991, Т. 55, вып. 6, стр. 1000-1006.

74. Несмелов Е.А., Гусев А.Г., Иванов О.Н., Матшина Н.П. Метод расчета оптических постоянных тонких диэлектрических пленок. //ОМП, 1991, №9, стр. 27-29.

75. Абсалямова Э.Х., Кольцов Ю.И., Матшина Н.П., Несмелов Е.А., Соболева Н.Н. Оптические постоянные пленок теллурида свинца в области спектра 5 – 11 мкм. // ЖПС, 1991, Т. 54, вып. 1, стр. 103-107

76. Биряльцева А.Р., Несмелов Е.А., Сафин Р.Г. Методы расчета оптических характеристик тонких металлических пленок.//Оптический журнал, 1993, №9, с.59-62.

77. Биряльцева А.Р., Несмелов Е.А., Сафин Р.Г. Простой метод расчета металлодиэлектрических теплоотражающих фильтров. // Оптический журнал, 1995, вып. 2, стр. 72-73.

78. Несмелов Е.А., Борисов А.Н., Никитин А.С., Гайнутдинов И.С. Влияние структуры слоев интерференционного покрытия на его оптические свойства. // Оптический журнал 1996, вып. 11, стр. 29-32

79. Ивaнoв В.А., Никитин А.С., Борисов А.Н. и др. Малогабаритный полихроматор. // Оптический журнал - 1997, - Т. 64, вып. 7, С. 73-74

80. Несмелов Е.А., Гайнутдинов И.С., Иванов В.А., Никитин А.С., Борисов А.Н. Разработка математической модели изменения свойств приповерхностных слоев твердого тела при энергетических воздействиях и программы расчета параметров модели, адекватных изменениям в твердом теле по результатам эллипсометрических измерений. //Фонд научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ республики Татарстан. Конкурс проектов '96. Казань, Унипресс, 1998, стр. 110-111

81. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А. Фильтры для многоканальных радиометров./ /Оптический журнал, 1999, Т. 66, вып. 4, стр. 74-76.



2-00

Отпечатано на ризографе.  
Бумага офсет. Заказ 03/12.  
Тираж 100 экз. ООП ТРО ВОИ т.: 31-55-02